

Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico

Original

Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico / Chiabrando, Filiberto; Lingua, Andrea Maria; Maschio, Paolo Felice; Rinaudo, Fulvio; Spano', Antonia Teresa. - ELETTRONICO. - (2012), pp. 1-12. (Intervento presentato al convegno Una giornata informale per i 70 anni del Prof. Carlo Monti - 3 Maggio 2012 tenutosi a Milano nel 3 maggio 2012).

Availability:

This version is available at: 11583/2499056 since:

Publisher:

Politecnico di Milano

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico

Filiberto CHIABRANDO (*), Andrea LINGUA (**), Paolo MASCHIO (**)

Fulvio RINAUDO (*), Antonia SPANO' (*)

Politecnico di Torino

C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino (TO)

(*) Dipartimento di Architettura e Design

(**) Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Keywords: UAV, low cost, ortofoto solida, DEM, fotogrammetria digitale, documentazione archeologica

Riassunto

I rilievi fotogrammetrici aerei sono generalmente costosi e permettono comunque di acquisire immagini con risoluzione limitata a causa delle quote a cui possono generalmente volare gli aerei attrezzati. Per questa ragione, sono stati sviluppati e verificati numerosi sistemi in grado di acquisire immagini digitali ad alta risoluzione per applicazioni fotogrammetriche a basso costo (palloni aerostatici, mongolfiere, aerei ed elicotteri ultraleggeri, ecc.): in questo ambito, i mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo (in inglese *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) rappresentano una delle tecniche più promettenti se dotati di camera digitale ad alta risoluzione.

In questo contributo, gli autori descrivono le modalità operative per l'acquisizione di immagini digitali a bassa quota mediante UAV multi-rotore e la loro successiva elaborazione per produrre, nel modo più automatico possibile, un supporto cartografico a grandissima scala (l'ortofoto solida di precisione) di ausilio a studi archeologici.

Introduzione

La documentazione metrica dei beni archeologici ha raggiunto oggi un elevato grado di definizione e sempre più spinge gli attori coinvolti nel processo di documentazione e rilievo alla sperimentazioni di metodologie di ultima generazione. Si sta assistendo ad un graduale ma continuo passaggio dai metodi tradizionali di raccolta dei dati, quali i rilievi diretti longimetrici, a sistemi ad elevata automazione quali laser scanner e fotogrammetria digitale tramite l'utilizzo di sistemi non convenzionali come gli UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), RPVs (*Remote Piloted Vehicles*) o piattaforme non motorizzate tra cui ad esempio palloni aerostatici frenati (Altan et al, 2004; Celykoian et al., 2003; Fotinopoulos, 2004), aquiloni (Aber et al., 2002; Bitelli et al., 2003; Bogacki et al., 2008) o pali telescopici (Chiabrando et al., 2010).

L'obiettivo comune di tali sistemi è quello di ottenere immagini aeree a bassa quota utili sia come pura documentazione dello scavo (Verhoeven, 2009) sia come dati primari che, grazie all'utilizzo di metodologie e tecniche tipiche della geomatica, possono essere trasformati in prodotti metricamente attendibili, necessari per una corretta rappresentazione e conoscenza dell'area investigata.

Le possibilità offerte dalla fotogrammetria digitale ed il continuo sviluppo di camere digitali compatte ad altissima risoluzione, associate ad una sempre maggiore miniaturizzazione e sostenibilità in termini di costi della sensoristica ha permesso, in questi ultimi anni, un sostanziale incremento dei sistemi UAV utilizzati per la realizzazione di rilievi fotogrammetrici in campo archeologico, architettonico ed ambientale.

Lo sviluppo di queste piattaforme nasce negli anni '50 per scopi militari, fino ad arrivare, ai giorni nostri, con livelli di tecnologia e prestazioni sempre più elevate. Oggi gli UAV vengono utilizzati

sia in campo militare che civile per operazioni di ricognizione, controllo, misure atmosferiche, valutazione dei danni, mappatura dei rischi naturali e altri fenomeni per i quali non è possibile un accesso diretto al sito. Tali velivoli sono classificati sulla base di specifiche diverse; la classificazione più efficace è stata redatta dall' *Unmanned Vehicle Systems International Association* (International Unmanned Aerial System Community, 2008). Secondo questa classificazione, gli UAV sono suddivisi in tre categorie principali a seconda del loro possibile utilizzo: *Tactic*, *Strategic* e *Special Purpose*. A loro volta le tre categorie principali sono suddivise in sottocategorie, in base alle loro caratteristiche e prestazioni: capacità di volo, quota massima raggiungibile, peso, autonomia. I sistemi utilizzati oggi a titolo principale per il rilievo e la documentazione a grandissima scala possono essere considerati appartenenti alla categoria *Tactic* (sottocategorie micro e mini UAVs). Nella successiva tabella 1 si riportano le caratteristiche dei sistemi che si riferiscono alla categoria *Tactic*.

Tactic UAVs Sottocategorie	Acronimo	Capacità di volo [Km]	Max quota di volo raggiungibile [m]	Autonomia [ore]	Peso[Kg]
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150-300	< 2	150
Close Range	CR	10-30	3000	2-4	150
Short Range	SR	30-70	3000	3-6	200
Medium Range	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8000	10-18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50-9000	0,5-1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14000	24-48	1500

Tabella 1: Classificazione degli UAVs *Tactic* a cura della *Unmanned Vehicle Systems International Association*

Le diverse esperienze eseguite a livello nazionale ed internazionale riportano l'utilizzo di differenti approcci con piattaforme differenti; dai sistemi non motorizzati, già accennati in precedenza (palloni, aquiloni ecc.), a quelli che prevedono l'utilizzo di motori elettrici o a combustione quali: gli aeromodelli ad ala fissa (Bendea et. al 2008, Cunningham et al. 2011, Haala et al. 2011, Scholtz et al 2011) e i mini-elicotteri (Eisenbeiss et al., 2005; Patias et al., 2007, 2009; Remondino et. al., 2009, 2011; Skarlatos et al., 2004; Spatalas et al., 2006; Theodoridou et al., 2000; Tokmakidis e Skarlatos, 2000; Scaioni et al. 2009).

Oggi, a seguito delle esperienze e dei test eseguiti su varie piattaforme dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino (Chiabrando et. al 2011), si è ormai orientati sull'utilizzo di mini-elicotteri non a singola elica ma supportati da sistemi a quattro, sei e otto eliche (i cosiddetti quadri, esa o epta-cotteri), in grado di coniugare: una migliore maneggevolezza e stabilità in fase di volo rispetto ai tradizionali mini-elicotteri con una sola elica; costi ridotti alla luce della sempre maggiore richiesta di tali piattaforme; una semplificazione nelle operazioni di controllo da parte dell'operatore addetto alla fase di volo ed acquisizione.

Il lavoro presentato nel seguente articolo riporta le prime esperienze eseguite con un esa-cottero messo a punto dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino. In particolare verranno descritti: le caratteristiche della piattaforma; la gestione della fase di acquisizione; i risultati ottenuti a seguito del processo di triangolazione aerea; la realizzazione del modello di elevazione utile alla realizzazione dell'ortofoto ed infine la predisposizione dell'ortofoto solida di precisione.

L'UAV utilizzato.

Il sistema utilizzato consiste in un mezzo aereo a basso costo a decollo e atterraggio verticale (*Vertical Take Off and Landing*) denominato HexaKopter di produzione Mikrokopter, venduto dalla casa madre in kit da assemblare. Come descritto dal nome, il velivolo è dotato di 6 ali rotanti, pesa circa 1.2 kg comprese le batterie e permette di sollevare un carico (*payload*) massimo di 1 kg.

La dotazione completa prevede alcune schede di controllo e un insieme di sensori di navigazione come indicato nello schema di Figura 1. In particolare, sono comprese le seguenti parti:

- 6 motori *Brushless* dotati di eliche da 10" di lunghezza;
- 6 schede *Brushless Controls* (BCs) che regolano la velocità di rotazione dei motori;
- 1 scheda *Flight Control* (FC) che utilizza un processore dedicato per ricevere i comandi inviati dal pilota a terra via radiocomando e interpretarli per l'esecuzione del volo definendo le caratteristiche della navigazione del velivolo in base ai numerosi sensori installati (giroscopio triassiale MEM di *Analog Devices*, accelerometro triassiale di *STMicroelectronics*, altimetro a misura barometrica, bussola digitale) e regolando di conseguenza la velocità di rotazione dei motori (mediante i BCs);
- 1 radiocomando permette il pilotaggio del mezzo ad un operatore addestrato, l'attivazione delle modalità di volo disponibili in tempo reale: impostazione/bloccaggio della quota di volo definita dall'altimetro, posizione bloccata in volo (*hold*), ritorno a casa (*return to home*), navigazione verso punti prestabiliti (*waypoint*), ausilio al radio comando manuale mediante la modalità *carefree*;
- 1 Navi Control (NC) che sfrutta un altro processore dedicato e permette di realizzare gli automatismi richiesti (stazionamento in una posizione fissa, ritorno a casa, rotazione azimutale del mezzo, navigazione su *waypoint*) elaborando i dati acquisiti da appositi sensori di navigazione, posizione (un ricevitore GPS) e assetto (Mk3MAG). Oltre a permettere la trasmissione in tempo reale dei dati di traiettoria e gli altri parametri di telemetria, la NC li memorizza su scheda micro SD inseribile in un apposito supporto;
- 1 ricevitore GPS (MKGPS) dotato di antenna leggera integrata nella scheda. Esso è costituito dal sensore LEA 4H (o LEA 6S nelle versioni più recenti) di produzione Ublox con possibilità di posizionamento DGPS (EGNOS, WAAS, ...) per un posizionamento con accuratezza sub metrica e trasmette via seriale le informazioni posizionali alla NC;
- 1 sensore MK3MAG dotato di un magnetometro triassiale che permette di definire l'assetto del velivolo mediante la misurazione di precisione del campo magnetico terrestre: per un utilizzo ottimale di questo sensore è necessaria una procedura di calibrazione per definire correttamente lo stato iniziale;
- 1 strumento di collegamento seriale wireless bidirezionale basato su XBee Pro 2 con portata nominale di 1 km in spazi aperti collegato alla porta seriale della NC e al PC utilizzato per la gestione delle operazioni durante l'esecuzione del volo;
- 1 PC che costituisce la stazione di controllo e permette di effettuare tutte le regolazioni necessarie per la corretta configurazione del sistema, definire i *waypoint* e trasmetterli alle memorie locali dell'esa-cottero, controllare la telemetria trasmessa durante il volo per verificarne l'efficacia e prevenire eventuali problemi.

La figura 1 mostra il sistema sopra descritto evidenziando alcuni dettagli tra cui la camera digitale utilizzata per finalità di presa fotogrammetrica e video. In questa applicazione è stata utilizzata la camera Sony Nex 5 con sensore CMOS di formato 23,5 x 15,6 mm (dimensioni APS-C), pixel di lato pari a 5 μ m per un totale di 14 Mpixel, ottica *pancake* con focale 16 mm. Durante il volo, lo scatto può essere controllato in remoto secondo 3 modalità di cui 2 ad azionamento manuale mediante radiocomando (scatto singolo o sequenza temporizzata regolato dalla FC), la terza automatica con scatto in corrispondenza di un evento definito in fase di pianificazione del volo, per esempio il passaggio da *waypoint* regolato dalla NC.

La camera digitale è montata su un sostegno servo-assistito che permette rotazioni controllate elettronicamente lungo 2 direzioni (attorno agli assi ξ e η disponendo la camera ad asse verticale). I movimenti del sostegno (e quindi della camera) sono regolabili manualmente mediante apposito controllo sul radiocomando o, automaticamente (dalla FC) compensando le rotazioni delle camera durante il volo per avere l'asse sempre con la stessa direzione (per esempio sempre verticale).

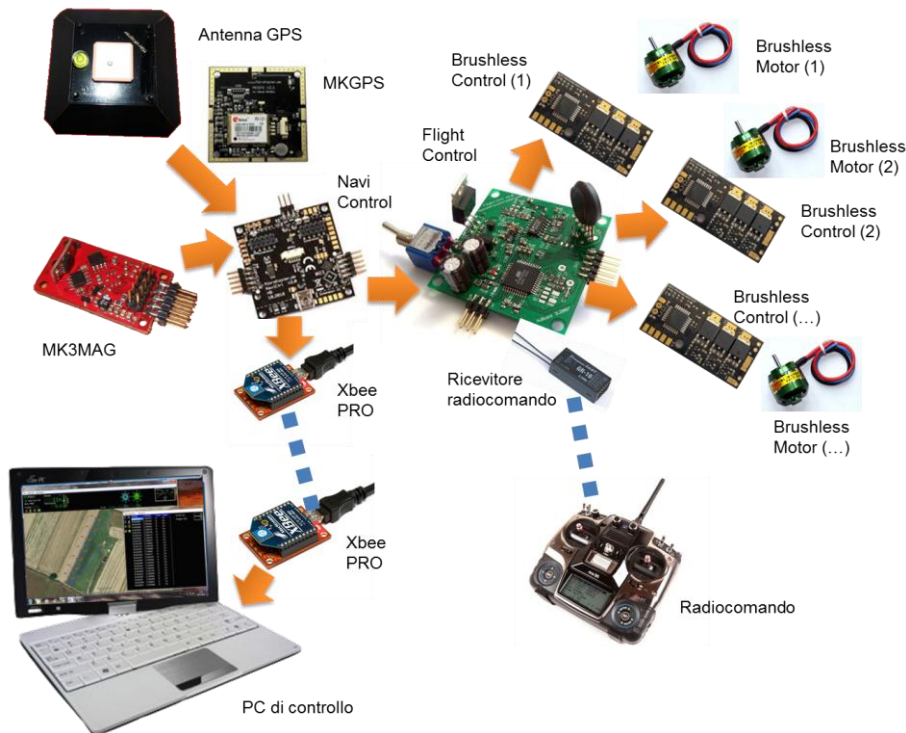


Figura 1: schema del sistema utilizzato basato su Hexakopter di Mikrokopter

La terza rotazione possibile attorno all'asse ζ (che per semplicità possiamo pensare sostanzialmente verticale) si può realizzare facendo ruotare orizzontalmente l'intero velivolo sia manualmente mediante l'apposito controllo del radio comando (*yaw*) sia in modo automatico fissando per ogni *waypoint* l'azimuth del mezzo.

A completamento del sistema è stata installata una telecamera a bassa risoluzione, visibile in Figura 2(d) con trasmissione analogica in tempo reale a 2.4 MHz. Il segnale viene ricevuto a terra, convertito mediante apposita strumentazione USB e memorizzato dalla stazione di controllo in formato video (AVI).

La zona di studio

Grazie alla collaborazione instaurata tra il Politecnico di Torino e l'Università di Trieste per la documentazione metrica delle emergenze archeologiche dello scavo di via Gemina ad Aquileia (UD), diretto dalla prof.ssa Federica Fontana, è stato possibile eseguire un test sulla *Domus* “dei putti danzanti”, così denominata dal soggetto di un raffinato mosaico che decorava gli ambienti di rappresentanza.

La *domus*, parzialmente riportata alla luce con scavi sistematici a partire dal 2005, è di età tardo-antica, risalente al IV secolo d.C. La sua posizione strategica (tra foro e porto fluviale), le sue dimensioni e caratteristiche costruttive fanno pensare che probabilmente essa apparteneva a una personalità di spicco dell'epoca, forse un funzionario imperiale (Fontana, 2010; Murgia, 2010).



Figura 2: La camera digitale Sony NEX-5 (a), l'antenna del ricevitore GPS Ublox (b), l'elettronica di controllo (c) dal basso verso l'alto: BL, FC, NC, MK3Mag, MKGPS e l'Hexakopter di Mikrokopter (d).

Sull'area da alcuni anni si svolgono campagne di rilievo integrato atte alla documentazione e rappresentazione dello scavo archeologico. Le finalità di tali operazioni sono dirette, oltre alla sperimentazione di strumentazioni e metodi non convenzionali per il rilievo in campo archeologico, alla costruzione di banche dati tridimensionali dalle quali derivare sia elaborati bidimensionali (planimetrie e sezioni verticali che costituiscono sempre un'indispensabile strumento di lavoro) sia modelli continui di superficie che consentano rapide ed efficaci visioni d'insieme delle emergenze archeologiche, e prevedano anche la possibilità di approfondite analisi dimensionali e tematiche grazie all'integrazione di tessiture fotografiche la cui qualità metrica è controllata dalla loro generazione fotogrammetrica (Spanò et al., 2011).

Nell'ottica di tali obiettivi si inserisce l'utilizzo di sistemi UAV atti all'acquisizione di dati utili alla realizzazione del processo fotogrammetrico, utilizzato nel caso in questione per la realizzazione di modelli digitali di elevazione, ortofoto e prodotti correlati.



Figura 3: Vista di insieme e dettaglio di un ambiente della Domus “dei putti danzanti”

L'acquisizione dei dati

L'acquisizione delle informazioni fotogrammetriche è stata pianificata sfruttando una ortofoto della zona derivata dal satellite Quickbird (Figura 4a) prevedendo 2 voli a scale differenti. Le scelte sulla geometria del volo sono state svolte in modo conservativo viste le caratteristiche dei sensori navigazionali dell'esa-cottero.

Il volo basso si sviluppa sui resti del cardo, a Est della zona di scavo, con un'altezza media di volo pari a 10 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di $10 \times 15 \text{ m}^2$. Il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 75 % garantendo una base di presa di circa 4 m, mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 30% per assorbire eventuali errori di inseguimento delle rotte fissate. In totale si è prevista l'acquisizione di 36 fotogrammi.

Il volo alto ricopre l'intera area interessata dallo scavo con un'altezza media di volo pari a 18 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di $18 \times 27 \text{ m}$. Il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 75 % garantendo una base di presa di circa 7.50 m, mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 40% ritenendo, alla quota di volo prevista, una maggior possibilità di instabilità del velivolo rispetto al volo basso. In totale si è prevista l'acquisizione di 60 fotogrammi.

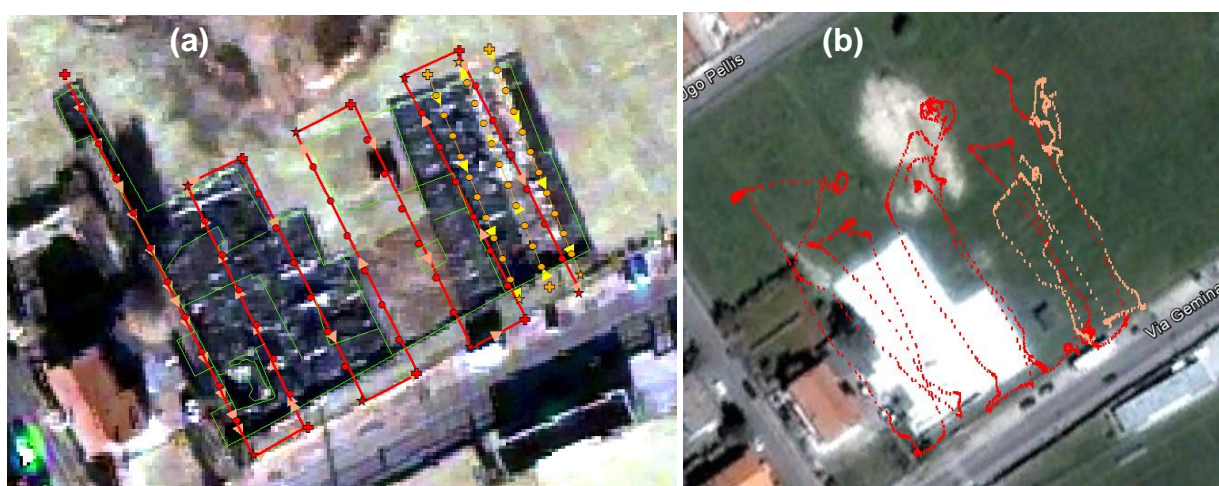


Figura 4: La pianificazione del volo svolta su ortofoto da satellite (Quickbird) (a) e la traiettoria effettiva dell'esacottero in ambiente Google Earth (b), in rosso il volo alto in arancione il volo basso

Dal progetto del volo sono state estratte le coordinate dei punti di inizio e fine strisciata (rappresentati rispettivamente da una croce e da una stella in Figura 4 a), in seguito inserite nel

software di controllo della stazione di terra e inviate alla memoria locale all'esa-cottero mediante la connessione wireless Xbee. Per ogni blocco, dopo il decollo eseguito manualmente, l'operatore ha fissato la quota di progetto con l'altimetro barometrico e avviato il volo autonomo dell'esa-cottero che ha seguito il percorso assegnatogli. Anche la fase di atterraggio è stata svolta manualmente.

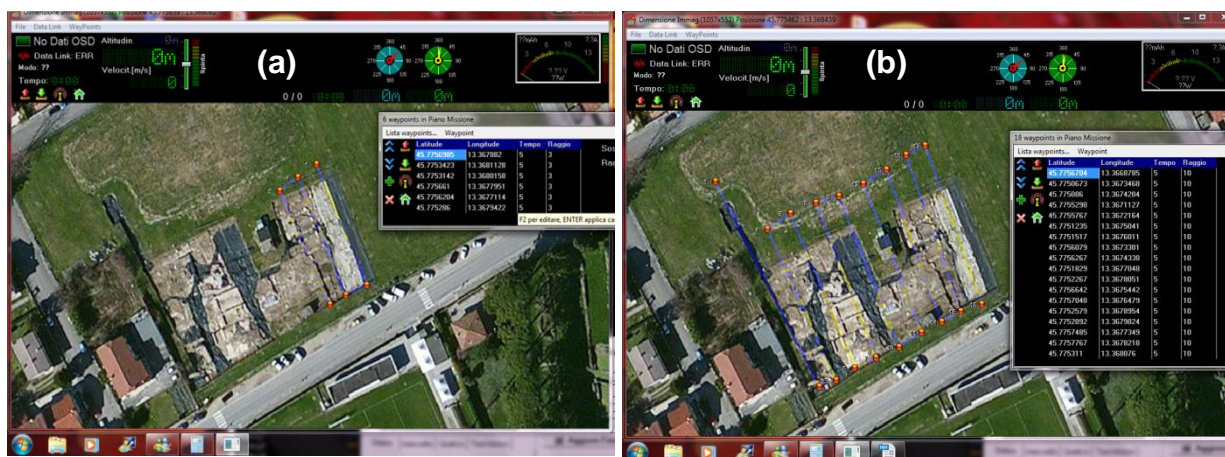


Figura 5: L'inserimento del planning all'interno della stazione di terra per il controllo del volo dell'esa-cottero per il volo basso (a) e il volo alto (b)

Le attuali tendenze della fotogrammetria digitale prevedono l'estrazione automatica dei punti di legame attraverso l'utilizzo delle tecniche di autocorrelazione di immagini e il calcolo degli orientamenti esterni dei fotogrammi con gli algoritmi propri della triangolazione a stelle proiettive. Operando in un sistema locale il vincolo geometrico minimo richiesto è una distanza nota per fissare la scala del blocco fotogrammetrico. La fotogrammetria insegna che anche in questi casi è necessario disporre di un congruo numero di punti noti per eliminare gli effetti dovuti alla labilità del sistema risolutivo. Quindi una attenta fase di appoggio è ritenuta sempre necessaria così come è buona norma prevedere sempre di avere a disposizione una serie di punti di controllo omogeneamente distribuiti all'interno del blocco per la verifica a posteriori dell'accuratezza dei risultati ottenuti. Questi punti di controllo sono poi riutilizzabili per le verifiche di accuratezza finale dei prodotti del rilievo che a partire dal blocco orientato si possono generare.

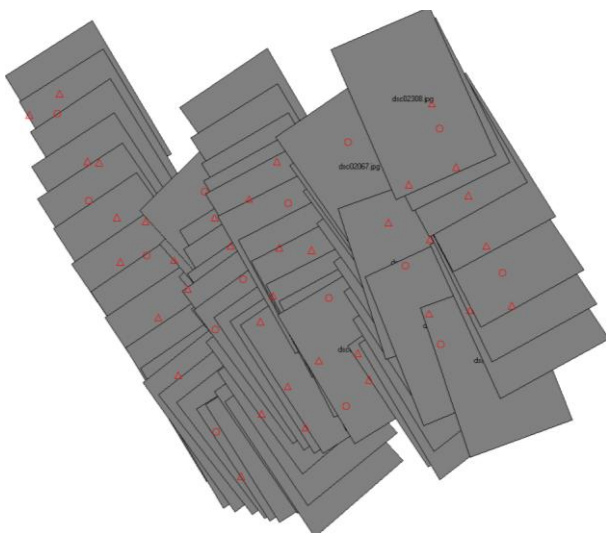
L'obiettivo in questa prima fase di elaborazione dei dati fotogrammetrici è stato quello di seguire una tradizionale procedura di triangolazione aerea utile alla generazione di un'ortofoto dell'intera area di scavo della *Domus* “dei putti danzanti” utilizzando le immagini acquisite dal volo alto.

sbandamenti differenti dovuti per la maggior parte all'influenza negativa delle raffiche di vento che si sono manifestate durante le operazioni di ripresa. Considerato il peso limitato dell'esacottero utilizzato questi fenomeni sono da considerarsi “normali” in condizioni operative reali.



Figura 6: immagini relative al blocco fotogrammetrico acquisito sulla Domus, si notano le sovrapposizioni non costanti ed alcune rotazioni delle immagini

Tuttavia grazie all'estrema flessibilità dell'algoritmo di triangolazione aerea implementato nel software di fotogrammetria utilizzato per l'elaborazione dei dati (LPS - Leica Photogrammetric Suite) è stato possibile orientare con successo le 60 immagini acquisite. Per le operazioni di orientamento sono stati utilizzati 30 GCPs e 15 CPs; inoltre per migliorare il concatenamento tra i vari fotogrammi impiegati sono stati individuati automaticamente circa 1200 punti di legame (TPs – *Tie Point*). La Figura 7 mostra il grafico del blocco fotogrammetrico a valle della triangolazione aerea e i risultati di precisione e accuratezza ottenuti.



Domus	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]
GCPs (30)	0.003	0.002	0.012
CPs (15)	0.010	0.005	0.020

Figura 7: Cattura schermo (sinistra) e deviazione standard sui GCPs e sui CPs del blocco fotogrammetrico orientato ($\sigma_0 = 10$).

I prodotti finali

Alla luce dei risultati ottenuti è stato possibile procedere sia al rilievo del modello digitale di superficie (DSM), con le procedure previste dal *software* LPS, sia alla generazione delle ortoproiezioni dei singoli fotogrammi ed alla successiva mosaicatura delle stesse (la Figura 8 riporta l'ortofoto dell'intera Domus). In funzione delle prime analisi eseguite su alcuni punti di controllo non utilizzati per il processo fotogrammetrico, essendo gli scarti inferiori a circa ± 3 cm, è possibile affermare che l'ortofoto realizzata rispetta le tolleranze tipiche di una rappresentazione a scala 1:200. Tale prodotto si inserisce perfettamente nell'ottica della documentazione multi-scala e

multi-precisione che sta alla base delle analisi archeologiche e può essere considerato un primo prodotto di documentazione a livello *intra-site* dello scavo archeologico di via Gemina ad Aquileia.

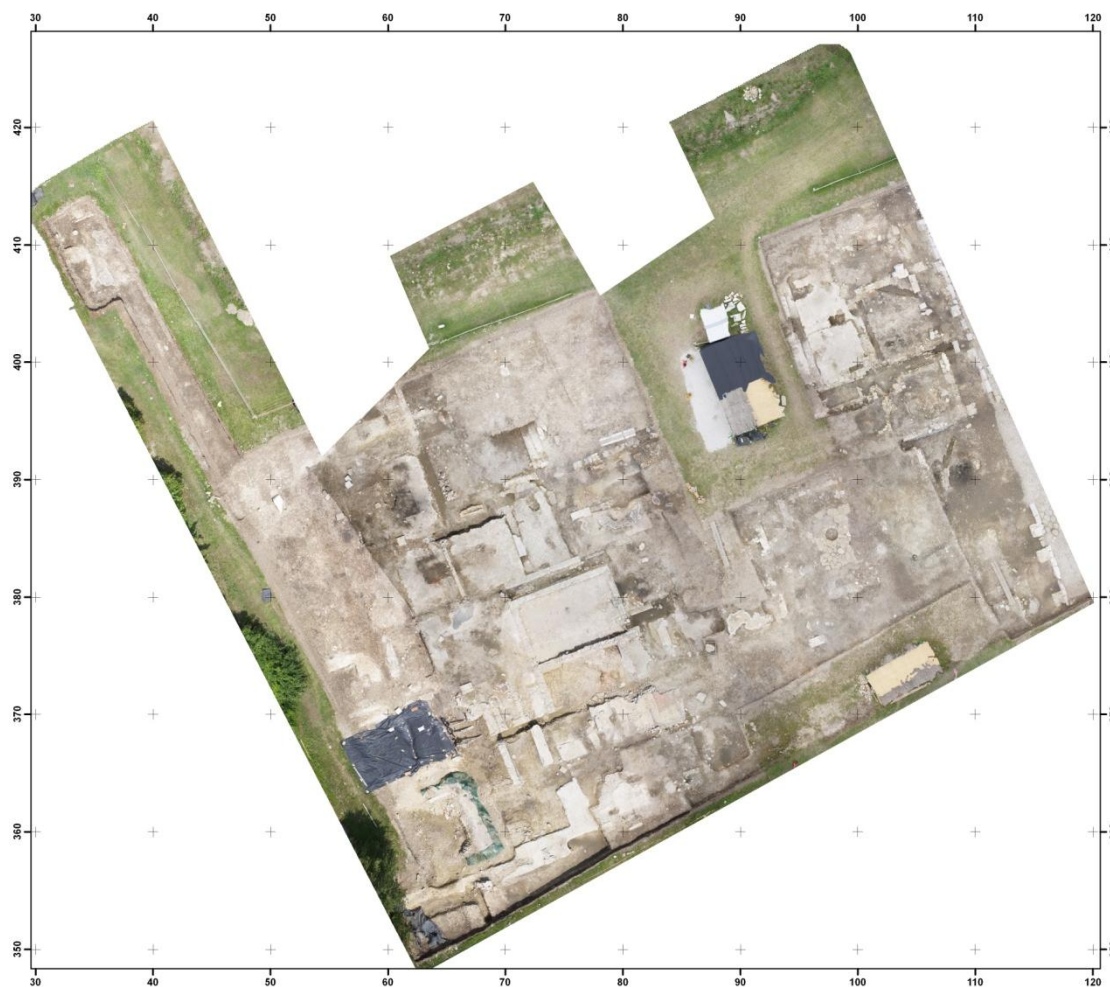


Figura 8: Ortofoto Domus "dei putti danzanti" scala originale 1:200

Un ulteriore prodotto che è stato realizzato, in grado di coniugare l'aspetto bidimensionale tipico dell'ortofoto a quello altimetrico tipico del modello altimetrico è l'ortofoto solida di precisione (OSP, Dequal et al, 2003). L'OSP è un prodotto raster che associa, ad ogni pixel di una matrice georeferenziata, le informazioni cromatiche (ed eventualmente radiometriche multi o iper-spettrali) e il valore di quota: in questo modo i dati disponibili possono essere collocati nella loro corretta posizione tridimensionale anche se l'utente può osservarne solamente la parte 2D (per es. l'ortofoto).

Vista l'intrinseca semplicità dei dati raster, una OSP può essere visualizzata e interrogata mediante un visualizzatore opportuno sviluppato in Visual Fortran con le routine grafiche GINO v. 7.5 molto facile ed intuitivo (Lingua 2007). E' possibile leggere le coordinate cartografiche per ogni posizione del cursore all'interno della OSP, effettuare le classiche operazioni di visualizzazione (pan, zoom), realizzare misurazioni di distanze, angoli, aree e volumi semplici, definire piani e sezioni del modello denso. Un piano può essere definito in vari modi per esempio impostando un punto di passaggio e i valori di inclinazione e immersione (*dip* e *dip direction*) quando noti o calcolandone i parametri mediante una procedura rigorosa ai minimi quadrati che utilizza le coordinate di punti scelti dall'utente e supposti giacenti su di esso. Numerosi piani così definiti possono essere utilizzati per calcolare volumi complessi come intersezione con la superficie del modello altimetrico.

La semplicità del software lo rende di immediato utilizzo, senza specifico addestramento per l'utente e ne permette una implementazione su tablet PC e altri strumenti informatici molto utili in applicazioni sul campo.

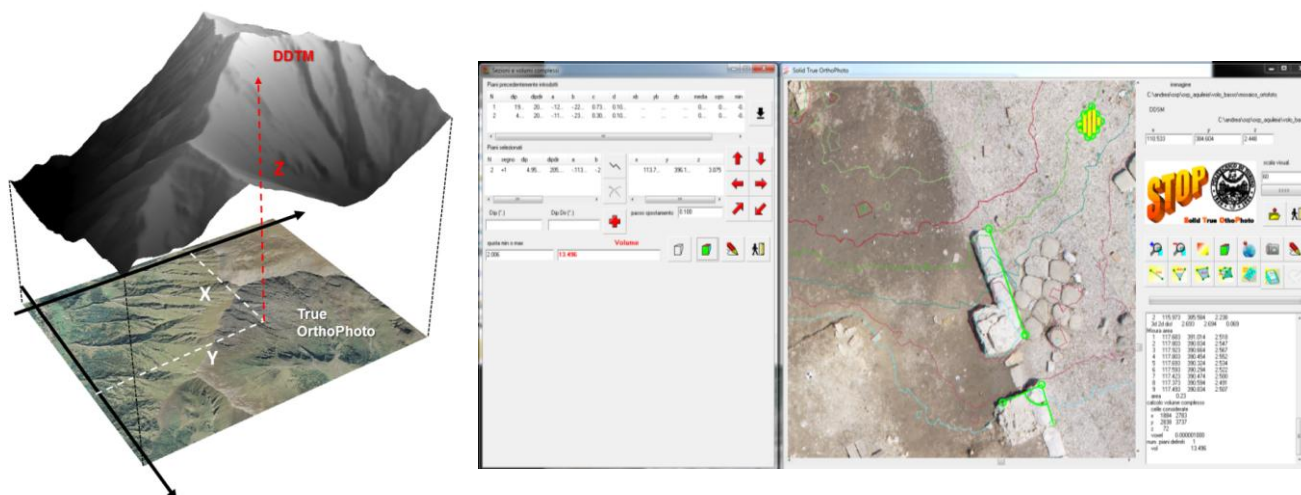


Figura 6: Definizione di ortofoto solida di precisione (sinistra), visualizzatore dell'OSP con alcuni esempi di misurazione definizione piani e sezioni, calcolo di volumi complessi (destra)

Conclusioni

Come già riscontrato e dimostrato ampiamente nelle diverse esperienze svolte a livello nazionale ed internazionale i sistemi non convenzionali per la realizzazione di prodotti cartografici a grandissima scala consentono di ottenere risultati metricamente corretti e di grande interesse per la documentazione multi-scala dell'archeologia. Il presente lavoro si prefiggeva due obiettivi fondamentali: la valutazione del sistema a basso costo recentemente acquisito e messo a punto dal gruppo di ricerca di Geomatica del Politecnico di Torino e la valutazione dei risultati ottenibili attraverso un processo fotogrammetrico di tipo tradizionale. Entrambi gli obiettivi sono stati raggiunti: il sistema ha consentito l'acquisizione di dati che, anche se non rispettavano completamente i canoni dei voli fotogrammetrici, hanno comunque consentito di eseguire tutte le fasi del processo fotogrammetrico con successo. Inoltre, il modello di elevazione e l'ortofoto ottenuti al termine delle elaborazioni rispetta ampiamente le tolleranze tipiche di un rilievo alla scala nominale 1:200 (congruente con la scala media dei fotogrammi acquisiti durante il volo alto).

Le analoghe elaborazioni che verranno eseguite con le immagini del volo basso potranno confermare quanto sopra dimostrato e aggiungere ulteriori conferme ai risultati fino ad ora raggiunti.

Dopo anni di sperimentazioni di sistemi di prese da bassa quota, la soluzione proposta sembra, per la prima volta, delineare un sistema facilmente utilizzabile. Considerati i tempi di realizzazione dei voli (circa 10 minuti per il volo alto) e i notevoli automatismi del processo di trattamento dei dati, tale tecnica può essere proposta anche come sistema di monitoraggio dei lavori di avanzamento giornaliero di uno scavo archeologico, dove gli esiti degli scavi eseguiti in una giornata sono la base per decidere le modalità operative da adottare nei giorni successivi.

Bibliografia

Aber, J. S., Aber, S. W., Pavri, F., 2002. Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery. ISPRS Archives, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS, Denver, CO, USA.

Altan, M. O., Celikoyan, T. M., Kemper, G., Toz, G., 2004. Balloon photogrammetry for cultural heritage. ISPRS Archives Vol. XXXV-B5, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, pp. 964-968.

Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Giulio Tonolo, F., Marenchino, D., Piras, M., 2008. Low cost UAV for post-disaster assessment. ISPRS Archives Vol. XXXVII, ISPRS Congress, Beijing, China, pp. 1373-1380.

Bitelli, G., Tini, M.A., Vittuari, L., 2003. Low-height aerial photogrammetry for archaeological orthoimaging production. ISPRS Archives Vol. XXXIV, Part 5/W12, pp. 55-59.

Bogacki, M., Malkowski, W., Misiewicz, K., 2008. Kite aerial photography (KAP) as a tool for completing GIS models. Ptolemais (Libya) case study. Lasaponara, R., Masini, N., Aracne (Eds.), Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop, CNR, Roma, pp. 329–332.

Bornaz L., Dequal S., Lingua A., 2006. L'ortofoto solida di precisione: un prodotto innovativo per la rappresentazione e la gestione dei dati tridimensionali. Atti Conferenza nazionale SIFET, Taranto.

Bornaz, L., Dequal, S., 2003. The solid image: A new concept and its applications. ISPRS Archives, Vol. 34, Part 6/W12.

Celikoyan, T.M., Altan, M.O., Toz, G., 2003. Evaluation of a theatre by using low-altitude aerial and terrestrial photogrammetry. ISPRS Archives Vol. XXXIV-5/C15, CIPA, Antalya, Turkey, pp. 375-379.

Chiabrando, F., Costamagna, E., Spano', A., Rinaudo, F., 2010. Very close nadiral images: a proposal for quick digging survey. ISPRS Archives, vol. XXXVIII/5, pp. 155-160.

Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F., 2011. UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). Journal of Archaeological Science, Volume 38, Issue 3, March 2011, Pages 697-710, ISSN 0305-4403, 10.1016/j.jas.2010.10.022.

Cunningham, K., Walker, G., Stahlke, E., Wilson R., 2011. Cadastral audit and assessments using unmanned aerial systems. ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.

Dequal S, Lingua A (2003) True orthophoto of the whole town of Turin. ISPRS Archives XXXIV-5/C15:263–268 ISSN: 1682-1750.

Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M., Zhang, L., 2005. Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. ISPRS Archives Vol. XXXIV-5/C34, CIPA, Torino, Italy, pp. 238-243.

- Fontana F., 2010, La domus “dei putti danzanti”. *Forma urbis*, Anno XV, n. 12, Dicembre 2010: 7-9.
- Fotinopoulos, V., 2004. Balloon photogrammetry for archaeological surveys. *ISPRS Archives Vol. XXXV-B5*, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, pp. 504-507.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Trittler, M., 2011. Performance test on UAV-based photogrammetric data collection. *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011*, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
- International Unmanned Aerial System Community, 2008. *Unmanned Aircraft System. The Global Perspective 2008/2009*.
- Lingua A, Agosto E, Del Bianco P (2007). *L'ortofoto solida di precisione a grandissima scala in ambito urbano*. Atti XI conferenza nazionale Asita. Torino, Italy, ISBN 978-88-903132-0-2.
- Murgia E., 2010, La domus “dei putti danzanti”. *Archeologia Viva*, anno XXIX, n. 141, maggio/giugno: 21.
- Patias, P., Saatsoglou-Paliadeli, C., Georgoula, O., Pateraki, M., Stamnas, A., Kyriakou, N., 2007. Photogrammetric documentation and digital representation of the macedonian palace in Vergina-Aegeae. *ISPRS Archives Vol. XXXVI-5/C53*, XXI CIPA Symposium, Athens, Greece.
- Patias P., Olga G., Charalampos G., Anastasios G, Tassopoulou M., 2009. Photogrammetric documentation and digital representation of excavations at Keros island in the Cyclades. *ISPRS Archives Vol. XXXVIII-3/W8*, XXII CIPA Symposium, Kyoto, Japan.
- Remondino, F., Gruen, A., Von Schwerin, J., Eisenbeiss, H., Rizzi, A., Sauerbier, M., Richards-Rissetto, H., 2009: Multi-sensors 3D documentation of the Maya site of Copan. *ISPRS Archives Vol. XXXVIII-3/W8*, XXII CIPA Symposium, Kyoto, Japan.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives. *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011*, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
- Scaioni M., Barazzetti L., Brumana R., Cuca B., Fassi F., Prandi F., 2009. RC-Heli and Structure & Motion Techniques for the 3-D Reconstruction of a Milan Dome Spire. *IAPRSSIS, Vol. 38, Part 5/W1*, Trento, Italy (on CDROM).
- Scholtz, A., Kaschwich, C., Krüger, A., Kufieta, K., Schnetter, P., Wilkens, C.-S., Krüger T., Vörsmann, P., 2011. Development of a new multi-purpose uas for scientific application. *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011*, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
- Spanò, A., Chiabrando, F., Rinaudo, F., 2011, Contributi della geomatica ai temi delle ricerche archeologiche di Aquileia, in *L'edilizia privata ad Aquileia e nel suo territorio*, Atti delle giornate di studio, Padova 21-22 febbraio 2011.
- Spatalas, S., Tsioukas, V., Daniil, M., 2006. The use of remote controlled helicopter for the recording of large scale urban and suburban sites *Proceedings of the scientific conference. Culture of Representation*, Xanthi, Greece.

Skarlatos, D., Theodoridou, S., Glabenas, D., 2004. Archaeological surveys in Greece using radiocontrolled helicopter. Proceedings of the FIG Working Week 2004, International Athenaeum Athens, Athens, Greece.

Theodoridou, S., Tokmakidis, K., Skarlatos, D., 2000. Use of Radio-Controlled Model Helicopters in archaeology Surveying and in Building Construction Industry. ISPRS Archives Vol. XXXIII-B5, XIX ISPRS Congress, Amsterdam, The Netherlands.

Tokmakidis, K., Skarlatos, D., 2000. Mapping Excavations and Archaeological Sites Using Close Range Photos. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, WG V/4, Corfu, Greece.

Verhoeven, G. J. J., 2009. Providing an archaeological bird's-eye view - an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. Archaeological Prospection 16(4), 233-249.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la prof. Federica Fontana per aver consentito la sperimentazione e tutti i suoi collaboratori e studenti per la pazienza e la collaborazione dimostrata.